

3. Ксенофонтова О.И. Пористый кремний и его применение в биологии и медицине / О.И. Ксенофонтова [и др.] Журнал технической физики. 2014. Т. 84. №1. С. 67.
4. Cui Y. Nanowire nanosensors for highly sensitive and selective detection of biological and chemical species / Y. Cui [et al.] // Science. 2001. №293. P. 1289.
5. Patolsky F. Fabrication of silicon nanowire devices for ultrasensitive, label-free, real-time detection of biological and chemical species / F. Patolsky [et al.] // Nature Protoc. 2006. №1. P. 1711.
6. Zhipeng H. Metal-Assisted Chemical Etching of Silicon: A Review / H. Zhipeng [et al.] // Advanced Materials. 2011. №23. P. 285.

МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЕДИНЕНИЙ $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ И ИХ АНАЛИЗ С УЧЕТОМ ДАННЫХ ПО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ

А. В. Петров¹, А. В. Блохин², Н. А. Каланда¹, Л. В. Ковалев¹

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», petrov@physics.by

²Белорусский государственный университет

Последнее десятилетие ознаменовалось открытием целого ряда оксидных материалов со структурой двойного перовскита ($\text{A}_2\text{FeMoO}_{6\pm\delta}$) ($\text{A} = \text{Ba}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{La}$ и др.), являющихся сильно коррелированными электронными системами и обладающих уникальными физико-химическими свойствами [1–3]. В данных материалах был обнаружен эффект гигантского магнитосопротивления, наблюдавшийся для некоторых составов при комнатных температурах и выше, как, например, в $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (с температурой Кюри (T_c) в диапазоне 400 – 450 К). В качестве модельных объектов данного исследования были выбраны соединения $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (SBFMO), $0 < x < 1$, так как в них происходит изменение точечной дефектности в кристаллической решетке в широких диапазонах. По сравнению с исходными, более широко изученными соединениями $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, твердые растворы SBFMO обладают важными преимуществами, связанными с введением добавки бария, а именно: более высокими значениями отрицательного магнитосопротивления, намагниченности насыщения и значительной величиной магнитокалорического эффекта в области комнатных температур за счет снижения T_c при введении в соединение бария [2]. Научная задача по изучению взаимосвязи магнитных и магниторезистивных свойств с термодинамическими характеристиками соединений SBFMO является актуальной, связанной с возможностью создания устройств электронной промышленности со специальными характеристиками.

Для синтеза образцов ферромолибдата стронция-бария в качестве исходных реагентов использовались реактивы SrCO_3 , BaCO_3 , Fe_2O_3 , MoO_3 марки “О.С.Ч.”. Термообработка образцов осуществлялась в резистивных термоустановках. Помол и перемешивание стехиометрической смеси исходных реагентов проводилось в планетарной шаровой мельнице типа «PM 100» производства фирмы Retsch GmbH (Германия). Полученные смеси сушились при температуре 350 К, прессовались в таблетки диаметром 10 мм, толщиной 4–5 мм и отжигались в политермическом режиме с последующей закалкой при комнатной температуре. Далее, образцы снова подвергались помолу в порошок с помощью планетарной шаровой мельницы.

Измерения намагниченности (M) образцов SBFMO в интервале температур 77 – 1050 К и в магнитном поле 0,86 Тл, проводились с помощью универсальной автоматизированной установки. Зависимости намагниченности от температуры (рис. 1) качественно подобны друг другу, и на них прослеживается уменьшение величины намагниченности с увеличением температуры. Хорошо заметно, что зависимости $M^2(T)$ разделяются на 2 ветви, первая из которых («низкотемпературная») изменяется с температурой быстрее, чем вторая («высокотемпературная»). Точка перехода «низкотемпературной» ветви в «высокотемпературную» ветвь соответствует температуре Кюри, значения которой изменяются в зависимости от состава образца. Изменение значений T_c и M образцов, в зависимости от их состава, хорошо прослеживаются по данным таблицы 1, в которой приведены основные результаты измерений.

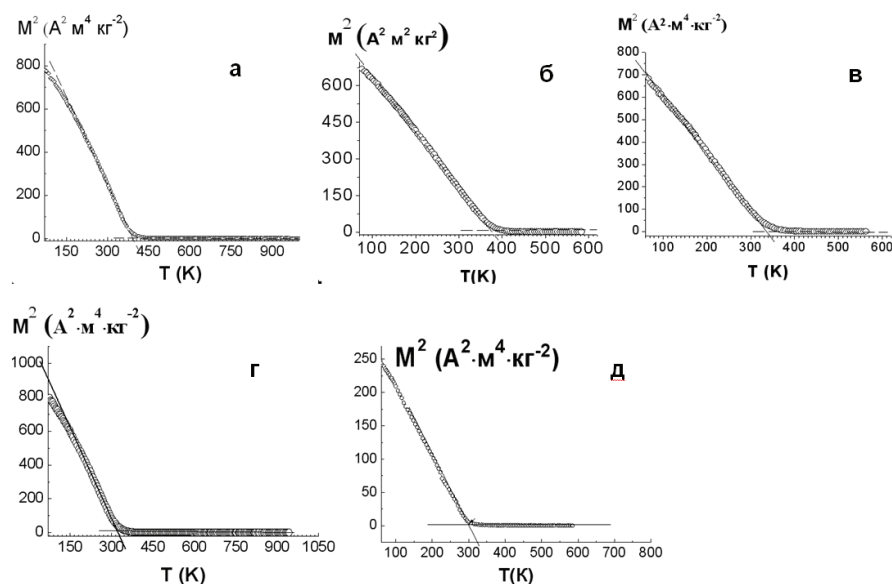


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности образцов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (а), $\text{Sr}_{1,6}\text{Ba}_{0,4}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (б), $\text{Sr}_{1,0}\text{Ba}_{1,0}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (в), $\text{Sr}_{0,4}\text{Ba}_{1,6}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (г) и $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (д)

Таблица 1

Результаты исследований температурных зависимостей намагниченности твердых растворов $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$

№	Образец	T_c , К	$M_{77\text{K}}$, $\mu_B/\text{отн.ед}$	$M_{300\text{K}}$, $\mu_B/\text{отн.ед}$
1	$\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$	405,0	2,31	1,26
2	$\text{Sr}_{1,6}\text{Ba}_{0,4}\text{FeMoO}_{6-\delta}$	377,0	2,11	1,18
3	$\text{Sr}_{1,0}\text{Ba}_{1,0}\text{FeMoO}_{6-\delta}$	333,0	2,0	1,11
4	$\text{Sr}_{0,4}\text{Ba}_{1,6}\text{FeMoO}_{6-\delta}$	312,0	2,0	1,11
5	$\text{Ba}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$	302,0	1,34	0,85

Установлено, что с увеличением доли бария в исследуемых образцах, прослеживается уменьшение T_c с 405 К до 302 К. Это может быть обусловлено изменением характера спин-спиновых взаимодействий в структуре двойного перовскита.

Теплоемкости в интервале 5 – 370 К пяти образцов оксидов переменного состава $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ измерены в полуавтоматическом вакуумном адиабатическом калориметре ТАУ-10 [4]. Анализ температурных зависимостей теплоемкости твердых растворов составов $\text{Sr}_{1,0}\text{Ba}_{1,0}\text{FeMoO}_{6-\delta}$, $\text{Sr}_{0,4}\text{Ba}_{1,6}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ показывает, что обнаруженные для них превращения относятся к фазовым переходам второго рода λ -типа (таблица 2). Широкие интервалы превращения (от 280 К до 365 К, от 240 К до 340 К и от 230 К до 340 К и соответственно), значительные по величине энтальпии переходов (108, 252 и 533 Дж·моль⁻¹, соответственно) подтверждают данные по намагниченности образцов в том, что рассматриваемые превращения связаны с переходом из ферримагнитного в парамагнитное состояние вещества. Температуры Кюри, найденные по максимуму избыточной теплоемкости в областях переходов и равные 336 К, 310 К и 300 К для соединений $\text{Sr}_{1,0}\text{Ba}_{1,0}\text{FeMoO}_{6-\delta}$, $\text{Sr}_{0,4}\text{Ba}_{1,6}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и $\text{Ba}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ хорошо согласуются с результатами магнитных измерений. Для сложных оксидов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и $\text{Sr}_{1,6}\text{Ba}_{0,4}\text{FeMoO}_{6-\delta}$ температуры переходов в парамагнитное состояние по результатам исследований намагниченности превышают допустимые значения температуры при измерениях теплоемкости (370 К).

Таблица 2

**Термодинамические параметры фазовых переходов
твердых растворов $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$**

№	Образец	Область перехода, К	Температура фазового перехода, К	Энтальпия фазового перехода, Дж·моль ⁻¹
1	$\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$	160 – 200 300 – 345	185,9 ± 0,2 333,1 ± 0,8	14,0 ± 0,3 17,0 ± 0,7
2	$\text{Sr}_{1,6}\text{Ba}_{0,4}\text{FeMoO}_{6-\delta}$	305 – 345	332,0 ± 0,6	17,1 ± 0,7
3	$\text{Sr}_{1,0}\text{Ba}_{1,0}\text{FeMoO}_{6-\delta}$	280 – 365	335,7 ± 0,5	108 ± 2
4	$\text{Sr}_{0,4}\text{Ba}_{1,6}\text{FeMoO}_{6-\delta}$	240 – 340	310,4 ± 1,0	252 ± 6
5	$\text{Ba}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$	230 – 340	300,0 ± 0,6	533 ± 1

Предельно малые по величине энтальпии обнаруженных для них переходов (14 и 17 Дж·моль⁻¹ для $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и 17 Дж·моль⁻¹ для $\text{Sr}_{1,6}\text{Ba}_{0,4}\text{FeMoO}_{6-\delta}$) и небольшие интервалы превращений (в пределах 45 К) свидетельствуют о том, что эти аномалии обусловлены не процессами в основной массе образцов, а связаны с примесными фазами или областями с упорядочением, отличным от ферримагнитного. Так, вероятнее всего, высокотемпературные переходы этих соединений (с температурами превращений 333 К для $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и 332 К для $\text{Sr}_{1,6}\text{Ba}_{0,4}\text{FeMoO}_{6-\delta}$) обусловлены переходом антиферромагнитных включений в ферримагнитной матрице в парамагнитное или ферримагнитное состояние. Слабо выраженный на кривой температурной зависимости теплоемкости переход $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ при 186 К с интервалом превращения от 160 К до 200 К может быть связан с расстекловыванием включений, в которых реализовано состояние спинового стекла. Существенно бо́льшая чувствительность метода адиабатической калориметрии, по сравнению с магнитными измерениями, позволяет обнаружить указанные переходы, не заметные на кривых намагниченности, и подтверждает существование магнитно-неоднородных областей в исследованных образцах.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф12ОБ – 047).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаевский, С.М. Магнитные фазовые диаграммы манганитов в области их электронного легирования / С.М. Дунаевский // Физика твердого тела. 2004. Т.46. №2. С.193.
2. Ritter, C. Structural and magnetic properties of double perovskites $AA'FeMoO_6$ ($AA' = Ba_2, BaSr, Sr_2$ and Ca_2) / C. Ritter [et. al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. 2000. Vol.12. P.8295.
3. Kalanda, N. Interplay between phase formation mechanisms and magnetism in the $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ metal-oxide compound / N. Kalanda [et al.] // Crystal Research and Technology. 2011. Vol. 46. P.463.
4. Blokhin, A.V. Thermodynamic properties of $[C_6mim][NTf_2]$ in the condensed state / A.V. Blokhin [et al.] // Journal of Chemical and Engineering Data. 2006. Vol. 51. P.1377.

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛ (Al) – ДИЭЛЕКТРИК (Si_3N_4) – ПОЛУПРОВОДНИК (n-Si) В РЕЖИМАХ СИЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ И ОБОГАЩЕНИЯ

Н. А. Поклонский¹, Н. И. Горбачук¹, С. В. Шпаковский²,
П. С. Бритько¹, П. И. Цибулько¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, gorbachuk@bsu.by

²ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь

1. Нитрид кремния используется при производстве полупроводниковых приборов [1, 2]. Однако большая плотность электронных и дырочных ловушек как в объеме [3], так и на границе раздела, ограничивает применение нитрида кремния [4] в качестве подзатворного диэлектрика в МДП транзисторах, но позволяет использовать Si_3N_4 при создании элементов запоминающих устройств [2, 3].

Традиционно для исследования границ раздела диэлектрик/полупроводник используются методы емкостной спектроскопии. Наличие высокой плотности электронных и дырочных ловушек приводит к дополнительной частотной зависимости емкости и затрудняет анализ экспериментальных данных. Выполнение измерений в широком интервале частот, построение и анализ эквивалентных схем замещения (ЭС), составляющие суть импедансной спектроскопии, позволяют существенно дополнить информацию, полученную из анализа традиционных вольт-фарадных характеристик.

Цель работы — исследовать импеданс МДП-структуры Al/ Si_3N_4 /n-Si в зависимости от частоты электрического поля и предложить эквивалентные схемы замещения для случаев обогащения n-Si вблизи границы Si_3N_4 /n-Si электронами и сильной инверсии (изменение типа электропроводности) n-Si вблизи этой границы под действием постоянного электрического напряжения между Al и n-Si.

2. МДП-структуры изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния n-типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см (КЭФ-4,5), выращенных методом Чохральского. Толщина пластин — 380 мкм. Слой нитрида кремния осаждался плазмохимическим методом из смеси моносилана и аммиака. Толщина слоя Si_3N_4 составляла 70 нм. На планарной стороне пластины поверх слоя нитрида кремния термическим напылением наносился слой алюминия толщиной 0,7 мкм. Площадь, покрытая алюминиевой металлизацией на нитриде кремния, составляла $1,85 \times 1,85$ мм². Для создания омического контакта к непланарной стороне кремниевой пластины проводилась диффузия фосфора по стандартной технологии